

# 一种快速 DSmT-DS 近似推理融合方法

郭 强<sup>①</sup> 何 友<sup>①</sup> 李新德<sup>②</sup><sup>①</sup>(海军航空工程学院信息融合技术研究所 烟台 264001)<sup>②</sup>(东南大学复杂工程测量与控制教育部重点实验室 南京 210096)

**摘要:** 该文对 Dempster-Shafer(DS)理论以及 Dezert-Smarandache 理论(DSmT)进行了深入研究, 为了能够在仅需较低计算复杂度的前提下得到更加精确的融合结果, 提出一种新的快速 DSmT-DS 近似推理融合方法。该方法针对超幂集空间仅单子焦元具有信度赋值的情况, 将超幂集空间拆分映射成元素为各单子焦元和其补集的二元集合的新的超幂集空间, 并求出每个补集的信度赋值; 再运用 Dezert-Smarandache 框架中的第 5 条比例冲突分配规则(DSmT+PCR5)在新的超幂集空间的二元集合子空间下对多证据源进行融合, 得到各单子焦元的融合结果; 然后通过归一化处理求得各单子焦元的信度赋值。通过理论分析得出该文方法的融合结果是介于 Dezert-Smarandache 框架中的第 5 条比例冲突分配规则(DSmT+PCR5)及 Dempster-Shafer(DS)框架下的 Dempster 组合规则之间。该文方法在需要较低计算复杂度的前提下, 可以得到优于 Dempster 组合规则的近似融合结果。最后通过多个角度与已有方法进行对比, 验证了该文方法的优越性。

**关键词:** 信息融合; 证据理论; Dezert-Smarandache 理论; 近似推理; 拆分映射

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)09-2040-07

DOI: 10.11999/JEIT150086

# Fast DSmT-DS Approximate Reasoning Method

Guo Qiang<sup>①</sup> He You<sup>①</sup> Li Xin-de<sup>②</sup><sup>①</sup>(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)<sup>②</sup>(Key Laboratory of Measurement and Control of CSE of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In this paper, Dempster-Shafer (DS) theory and Dezert-Smarandache Theory (DSmT) are conducted thorough research, and in order to obtain more accurate fusion results in the premise of needing less computation complexity, a fast DSmT-DS approximate reasoning method is proposed. This method is only fit for the case that there are only singleton focal elements with assignments in hyper-power set. The hyper-power set is splitted and mapped to a new hyper-power set which consists of the binary sets of the focal element and its complementary set to the assignments of the complementary sets are computed. Proportional Conflict Redistribution No.5 within Dezert-Smarandache framework (DSmT+PCR5) is applied to fuse the multi-source evidence in the binary sets of the new hyper-power set to get the fusion results of singleton focal elements. Then the assignments of singleton focal elements are obtained by normalization. Through the theoretical analysis, the conclusion is drawn that the fusion results of the method in this paper is between the results of DSmT+PCR5 and Dempster's combination rule based on DS model, and the fusion results of the method in this paper which is better than the results of Dempster's combination rule can be obtained in the premise of minimal computation complexity. Finally, by comparing the method in this paper with the existing methods from different views, the superiority of new one is testified well.

**Key words:** Information fusion; Evidence theory; Dezert-Smarandache Theory (DSmT); Approximate reasoning; Splitting mapping

## 1 引言

信息融合技术作为一门蓬勃发展的新兴关键技

2015-01-15收到, 2015-03-27改回, 2015-06-29网络优先出版  
国家自然科学基金(61102166, 61471379)和山东省优秀中青年科学  
家科研奖励基金(BS2013DX003)资助课题  
\*通信作者: 郭强 gq19860209@163.com

术, 由于可以将多个信源采集的不完整信息加以综合, 减少多源信息间可能存在的冗余和矛盾信息, 降低其不确定性, 提高智能系统决策、规划、反应的快速正确性, 近年来得到国内外学者的广泛重视, 并在军事和国民经济等多个领域得到了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。随着信息环境的日益复杂, 越来越多的信

息获取、融合和智能决策系统对于如何高效地融合高冲突、不完善、不精确的不确定证据信息提出了更高的要求。DSmT 理论 (Dezert-Smarandache Theory)是由文献[5]提出的一种新的处理不确定、高度冲突和不精确的证据源的融合问题的有效方法。它可以看作是 DST 理论 (Dempster-Shafer Theory) 的扩展, 却不受 DS (Dempster-Shafer) 框架的限制, 可以有效处理复杂的静态或动态融合问题, 特别是当信息源间的冲突非常大时, 或者是所考虑问题的框架  $\Theta$  中命题之间的界限模糊、不确定、不精确而很难细分时, DSmT 都发挥了它的优势<sup>[6,7]</sup>。目前该理论方法已在图像处理、机器人环境感知、军事上的多目标跟踪与识别、故障诊断、雷达目标分类等领域都得到了广泛的应用<sup>[8-12]</sup>。而现阶段推广和应用 DSmT 最突出的瓶颈问题是, 随着鉴别框架中焦元数目的增多, 其组合推理运算成指数级增长。

为了解决这一问题, 文献[13,14]提出一种快速分层递阶的 DSmT 近似推理融合方法。该方法的融合结果在保持与 DSmT 经典方法融合结果较高信息相似度的前提下, 计算量显著减少, 较好地解决了 DSmT 的计算瓶颈问题。但该方法在信息源存在较高的冲突时, 正确结果焦元的信度赋值会向其它焦元转移, 导致各焦元的信度赋值融合结果较平均, 对冲突证据源敏感性弱, 而且该方法需要对每一个二叉树分组的焦元进行 Dezert-Smarandache 框架中的第 5 条比例冲突分配规则 (Proportional Conflict Redistribution No.5 within Dezert-Smarandache framework, DSmT+PCR5) 融合计算, 分组的粒度随着焦元数目的增多而增多, 导致计算量仍然较大。

因此, 本文提出一种新的快速 DSmT-DS 近似推理融合方法。该方法针对仅单子焦元具有信度赋值情况, 将超幂集空间拆分映射成元素为各单子焦元和其补集的二元集合的新的超幂集空间, 并求出新超幂集空间中每个子空间中单焦元的补集的信度赋值。然后运用 DSmT+PCR5 规则分别在映射形成的新的超幂集空间的二元集合子空间下对证据源进行融合, 得到各单子焦元的融合结果, 最后通过归一化求得每一个单子焦元的信度赋值。通过理论分析得出本文方法求得的融合结果是介于 DSmT+PCR5 及 Dempster 规则之间且优于 Dempster 规则的近似融合结果。通过计算复杂度分析得出, 本文方法计算复杂度极小。仿真实验结果表明, 该方法不仅计算复杂度极小, 融合结果相似度更高, 而且对于高冲突信息的融合问题, 相比已有的近似融合方法, 可以得到一个更精确的近似融合结果。

## 2 基本理论

### 2.1 DS 框架下的 Dempster 组合规则

$$m(A) = \frac{1}{1-k} \cdot \sum_{A_i \cap B_j \cap C_l \cap \dots = A} [m_1(A_i)m_2(B_j)m_3(C_l)\dots] \quad (1)$$

$$k = \sum_{A_i \cap B_j \cap C_l \cap \dots = \emptyset} [m_1(A_i)m_2(B_j)m_3(C_l)\dots] \quad (2)$$

在传统证据理论中系数  $k$  表示证据间冲突程度, 其值越大说明证据之间的冲突越大<sup>[15,16]</sup>。

### 2.2 DSm 框架下的 PCR5 融合规则

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{PCR5}}[\emptyset] &= 0, \forall X \in G^\Theta \setminus \emptyset \\ m_{\text{PCR5}}[X] &= m_{12}(X) + \sum_{\substack{Y \in G^\Theta \setminus \{X\} \\ X \cap Y = \emptyset}} \left[ \frac{m_1(X)^2 m_2(Y)}{m_1(X) + m_2(Y)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{m_2(X)^2 m_1(Y)}{m_2(X) + m_1(Y)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, 卷入式(3)中所有的元素都是规范形式, 当证据信息模型为 DS 模型时,  $G^\Theta$  等价于幂集空间  $2^\Theta$ , 当证据信息模型为存在约束的混合 DSm 模型时,  $G^\Theta$  等价于超幂集空间  $D^\Theta$ ,  $\forall X \in G^\Theta \setminus \emptyset$  代表  $X$  为  $G^\Theta$  中的任意非空焦元,  $Y$  代表  $G^\Theta$  中与  $X$  没有交集的非空焦元,

$$m_{12}(X) = m_{\cap}(X) = \sum_{\substack{x_1, x_2 \in G^\Theta \\ x_1 \cap x_2 = X}} m_1(x_1)m_2(x_2)$$

即  $m_{12}(x)$  对应两个证据源合取一致的组合结果, 并且规定所有分式的分母不为 0, 当分式等于 0 时该分式为 0<sup>[5]</sup>。

## 3 一种快速 DSmT-DS 近似推理融合方法

本文提出一种快速 DSmT-DS 近似推理融合方法, 该方法程序流程如图 1 所示。其主要步骤为:

步骤 1 首先判断超幂集空间  $D^\Theta$  中的单子焦元个数  $n$  是否大于 3, 若是, 转入步骤 2; 否则, 转入步骤 6。

步骤 2 将超幂集空间  $D^\Theta$  依照其中的各单子焦元拆分映射到新的超幂集空间  $D^\Theta$ , 新超幂集空间中的元素为各单子焦元和它的补集的集合。

步骤 3 求出新的超幂集空间  $D^\Theta$  中各子空间的单子焦元的补集的信度赋值, 得到  $k$  个证据源在新的超幂集空间下各子空间的信度赋值。

步骤 4 采用式(3)对  $k$  个证据源在新的超幂集空间下各子空间中的各单子焦元和其补集的信度赋值进行 DSmT+PCR5 融合推理得到各单子焦元的融合结果。

步骤 5 对步骤 4 求得的各单子焦元的信度赋值进行归一化处理。

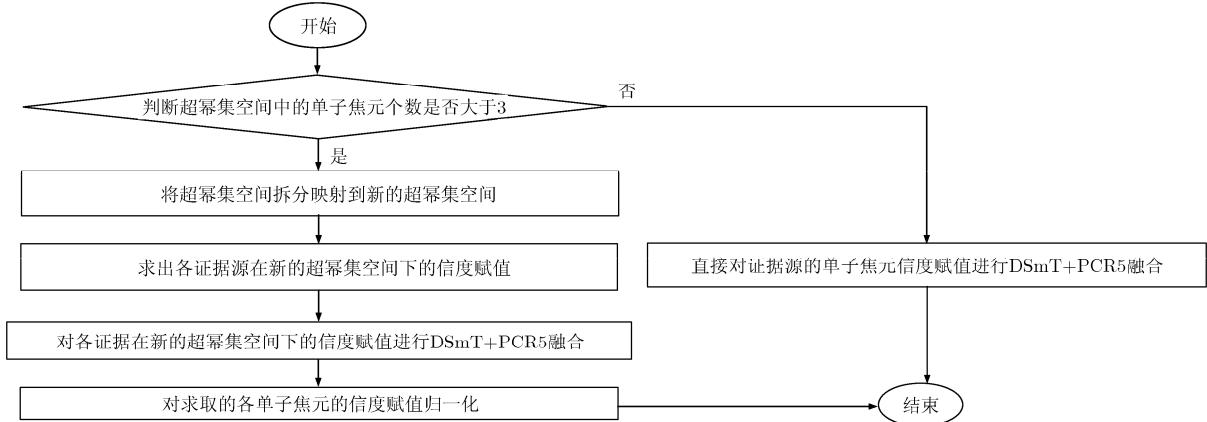


图 1 快速 DSmT-DS 近似推理融合方法程序流程图

步骤 6 直接采用式(3)对  $k$  个证据源的各焦元的信度赋值进行 DSmT+PCR5 融合推理。

### 3.1 超幂集空间拆分映射

假设有两个信息源  $S_1$  和  $S_2$  (鉴别框架相同, 即  $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ , 其中  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  代表鉴别框架中的焦元), 各个焦元具有互相排他性, 即  $\theta_i \cap \theta_j = \emptyset$ 。对其超幂集空间  $D^\Theta$  依次按照其含有的单子焦元进行拆分映射, 拆分映射到新的超幂集空间  $D^{\Theta'}$ , 其中的元素为各单子焦元和它的补集的二元集合, 实际上, 每一个  $D^{\Theta'}$  的元素都包含了  $D^\Theta$  的空间, 本文也称元素为一个子空间, 即将  $D^\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$  拆分映射到

$$D^{\Theta'} = \{D^{\Theta_1} = \{\theta_1, \bar{\theta}_1\}, D^{\Theta_2} = \{\theta_2, \bar{\theta}_2\}, \dots, D^{\Theta_i} = \{\theta_i, \bar{\theta}_i\}, \dots, D^{\Theta_n} = \{\theta_n, \bar{\theta}_n\}\} \quad (4)$$

其中,  $\bar{\theta}_1 = \{\theta_2, \dots, \theta_n\}$ ,  $\bar{\theta}_n = \{\theta_1, \dots, \theta_{n-1}\}$ ,  $\bar{\theta}_i = \{\theta_1, \dots, \theta_{i-1}, \theta_{i+1}, \dots, \theta_n\}$ ,  $1 < i < n$ 。

### 3.2 求新超幂集空间的各单子焦元信度赋值

由 3.1 节可知, 映射生成的新超幂集空间的元素不是传统意义上的单焦元或多焦元, 而是由单焦元和它的补集构成的二元集合子空间, 如其中的第  $i$  个元素, 也称子空间  $D^{\Theta_i}$ , 由单子焦元  $\theta_i$  和其补集  $\bar{\theta}_i = \{\theta_1, \dots, \theta_{i-1}, \theta_{i+1}, \dots, \theta_n\}$  构成, 其补集  $\bar{\theta}_i$  的信度赋值为

$$m_k(\bar{\theta}_i) = m_k(\theta_1) + m_k(\theta_2) + \dots + m_k(\theta_{i-1}) + m_k(\theta_{i+1}) + \dots + m_k(\theta_n) = 1 - m_k(\theta_i) \quad (5)$$

其中, 下标  $k$  代表第  $k$  个证据源, 则第  $k$  个证据源的新的超幂集空间下的信度赋值为

$$m_k^{D^{\Theta'}} = \{\{m_k(\theta_1), m_k(\bar{\theta}_1)\}, \dots, \{m_k(\theta_i), m_k(\bar{\theta}_i)\}, \dots, \{m_k(\theta_n), m_k(\bar{\theta}_n)\}\} \quad (6)$$

### 3.3 对新的超幂集空间的子空间进行 DSmT+PCR5 融合

如假设  $k = 2$ , 则每个证据源在新的超幂集空

间上的信度赋值为

$$m_1^{D^{\Theta'}} = \{\{m_1(\theta_1), m_1(\bar{\theta}_1)\}, \{m_1(\theta_2), m_1(\bar{\theta}_2)\}, \dots, \{m_1(\theta_n), m_1(\bar{\theta}_n)\}\},$$

$$m_2^{D^{\Theta'}} = \{\{m_2(\theta_1), m_2(\bar{\theta}_1)\}, \{m_2(\theta_2), m_2(\bar{\theta}_2)\}, \dots, \{m_2(\theta_n), m_2(\bar{\theta}_n)\}\}$$

对两证据源在新的超幂集空间中对应的相同单子焦元和其补集的子空间进行 DSmT+PCR5 融合推理得到各单子焦元  $\theta_i, 1 \leq i \leq n$  的信度赋值为

$$m_{12\text{PCR5}}^{D^{\Theta'}}(\theta_i) = m_1(\theta_i)m_2(\theta_i) + \left[ \frac{m_1(\theta_i)^2 m_2(\bar{\theta}_i)}{m_1(\theta_i) + m_2(\bar{\theta}_i)} + \frac{m_2(\theta_i)^2 m_1(\bar{\theta}_i)}{m_2(\theta_i) + m_1(\bar{\theta}_i)} \right] \quad (7)$$

### 3.4 归一化处理

从 DSmT+PCR5 规则式(3)分析可知, 当使用单子焦元  $\theta_i$  的补集  $\bar{\theta}_i$  的信度赋值取代补集中各焦元  $\{\theta_1, \dots, \theta_{i-1}, \theta_{i+1}, \dots, \theta_n\}$  的信度赋值求得  $m_{12\text{PCR5}}(\theta_i)$ , 由于补集  $\bar{\theta}_i$  为一个焦元相比各单子焦元对于  $\theta_i$  的信度赋值强度更强, 融合过程中冲突焦元的信度赋值会有一部分按照比例转移给了  $m_{12\text{PCR5}}(\bar{\theta}_i)$ , 而使  $m_{12\text{PCR5}}(\theta_i)$  减少,  $\sum_{i=1}^n m_{12\text{PCR5}}(\theta_i) < 1$ , 本文通过将 3.3 节得到的初步融合结果归一化, 平均了各焦元损失的信度赋值, 得到单焦元  $\theta_i$  的最终的信度赋值, 即

$$m_{12}(\theta_i) = \frac{m_{12\text{PCR5}}(\theta_i)}{\sum_{i=1}^n m_{12\text{PCR5}}(\theta_i)} \quad (8)$$

## 4 分析快速 DSmT-DS 融合结果与 DSmT+PCR5 及 Dempster 规则融合结果的关系

对式(7)和式(8)进行分析, 得出本文方法融合结果与 DSmT+PCR5 及 Dempster 组合规则融合结果的关系。令  $m_1(\theta_i) = x_i, m_2(\theta_i) = y_i$ , DSmT+PCR5 规则中对  $\theta_i$  的每一项的冲突分配表示为  $\text{PCR}_{x_i y_i}$  和

$\text{PCR}_{y_i x_j}$ ,  $i \neq j$ , 即如果使用 DSmT+PCR5 规则, 得出的焦元  $\theta_i$  的基本信度赋值为

$$\begin{aligned} m_{12\text{PCR5}}^{D^\theta}(\theta_i) &= m_1(\theta_i)m_2(\theta_i) + \sum_{\substack{\theta_j \in D^\theta / \theta_i \\ \theta_i \cap \theta_j = \emptyset}} \left[ \frac{m_1(\theta_i)^2 m_2(\theta_j)}{m_1(\theta_i) + m_2(\theta_j)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{m_2(\theta_i)^2 m_1(\theta_j)}{m_2(\theta_i) + m_1(\theta_j)} \right] \\ &= x_i \cdot y_i + \text{PCR}_{x_i y_1} + \cdots + \text{PCR}_{x_i y_j} + \cdots \\ &\quad + \text{PCR}_{x_i y_n} + \text{PCR}_{y_i x_1} + \cdots \\ &\quad + \text{PCR}_{y_i x_j} + \cdots + \text{PCR}_{y_i x_n} \end{aligned} \quad (9)$$

令 DSmT+PCR5 规则中对  $\theta_i$  的总冲突分配表示为  $\text{PCR}_i$ , 则

$$\begin{aligned} \text{PCR}_i &= \text{PCR}_{x_i y_1} + \cdots + \text{PCR}_{x_i y_j} + \cdots + \text{PCR}_{x_i y_n} \\ &\quad + \text{PCR}_{y_i x_1} + \cdots + \text{PCR}_{y_i x_j} + \cdots + \text{PCR}_{y_i x_n} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{12\text{PCR5}}^{D^\theta}(\theta_i) &= m_1(\theta_i)m_2(\theta_i) \\ &\quad + \left[ \frac{m_1(\theta_i)^2 m_2(\bar{\theta}_i)}{m_1(\theta_i) + m_2(\bar{\theta}_i)} + \frac{m_2(\theta_i)^2 m_1(\bar{\theta}_i)}{m_2(\theta_i) + m_1(\bar{\theta}_i)} \right] \\ &= x_i \cdot y_i + \frac{x_i^2 \cdot \sum_{j \neq i} y_j}{x_i + \sum_{j \neq i} y_j} + \frac{y_i^2 \cdot \sum_{j \neq i} x_j}{y_i + \sum_{j \neq i} x_j} \\ &= x_i \cdot y_i + \frac{x_i^2 \cdot y_1}{x_i + \sum_{j \neq i} y_j} + \cdots + \frac{x_i^2 \cdot y_j}{x_i + \sum_{j \neq i} y_j} \\ &\quad + \cdots + \frac{x_i^2 \cdot y_n}{x_i + \sum_{j \neq i} y_j} + \frac{y_i^2 \cdot x_1}{y_i + \sum_{j \neq i} x_j} + \cdots \\ &\quad + \frac{y_i^2 \cdot x_j}{y_i + \sum_{j \neq i} x_j} + \cdots + \frac{y_i^2 \cdot x_n}{y_i + \sum_{j \neq i} x_j} \end{aligned}$$

其中,  $j = \{1, 2, \dots, n\}$  且  $j \neq i$ , 通过式(9), 上式可以转化为

$$\begin{aligned} m_{12\text{PCR5}}^{D^\theta}(\theta_i) &= x_i \cdot y_i + \frac{x_i + y_1}{x_i + \sum_{j \neq i} y_j} \cdot \text{PCR}_{x_i y_1} + \cdots \\ &\quad + \frac{x_i + y_j}{x_i + \sum_{j \neq i} y_j} \cdot \text{PCR}_{x_i y_j} + \cdots \\ &\quad + \frac{x_i + y_n}{x_i + \sum_{j \neq i} y_j} \cdot \text{PCR}_{x_i y_n} + \frac{y_i + x_1}{y_i + \sum_{j \neq i} x_j} \\ &\quad \cdot \text{PCR}_{y_i x_1} + \cdots + \frac{y_i + x_j}{y_i + \sum_{j \neq i} x_j} \cdot \text{PCR}_{y_i x_j} \\ &\quad + \cdots + \frac{y_i + x_n}{y_i + \sum_{j \neq i} x_j} \cdot \text{PCR}_{y_i x_n} \end{aligned} \quad (10)$$

令各项冲突的系数为  $k_t$ ,  $t = 1, 2, \dots, 2n - 2$ , 则式(10)可以转化为

$$\begin{aligned} m_{12\text{PCR5}}^{D^\theta}(\theta_i) &= x_i \cdot y_i + k_1 \cdot \text{PCR}_{x_i y_1} + \cdots + k_j \cdot \text{PCR}_{x_i y_j} \\ &\quad + \cdots + k_{n-1} \cdot \text{PCR}_{x_i y_n} + k_n \cdot \text{PCR}_{y_i x_1} \\ &\quad + \cdots + k_{n+j-1} \cdot \text{PCR}_{y_i x_j} + \cdots \\ &\quad + k_{2n-2} \cdot \text{PCR}_{y_i x_n} \end{aligned}$$

为了表述方便, 假设其中各项  $k_t$  相等, 记为  $k_{\theta_i}$ , 则

$$m_{12\text{PCR5}}^{D^\theta}(\theta_i) = x_i \cdot y_i + k_{\theta_i} \cdot \text{PCR}_i \quad (11)$$

由式(11)可知, 当  $k_{\theta_i}$  接近于 1 时, 本文方法等效于 DSmT+PCR5; 而当  $k_{\theta_i}$  接近于 0 时, 由于归一化公式(8)的运用, 本文方法等效于 Dempster 规则, 然而  $k_t$  的取值范围是  $[x_i / (x_i + \sum_{j \neq i} y_j), 1]$  或  $[y_i / (y_i + \sum_{j \neq i} x_j), 1]$ , 这决定了冲突再分配的精度, 当各项  $k_t$  值越大, 本文方法得到的近似融合结果与 DSmT+PCR5 的结果越接近, 所以本文方法得到的融合结果, 是介于 DSmT+PCR5 的结果与 DS 框架下的 Dempster 组合规则的结果之间且优于 Dempster 组合规则的近似融合结果, 故称为快速 DSmT-DS 近似推理融合方法。

## 5 计算复杂度对比分析

针对仅有两个证据源, 且超幂集空间中仅单子焦元有信度赋值 ( $D_k^\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ ,  $k = 1$  或  $2$ ,  $n$  代表焦元个数) 的情况, 首先直接采用 DSmT+PCR5 方法(以下简称经典方法)对两证据源融合过程进行计算复杂度分析, 然后对文献[13]方法进行计算复杂度分析, 最后对本文提出的快速 DSmT-DS 近似推理融合方法(以下简称本文方法)进行分析, 通过计算复杂度的理论分析对比 3 种方法的计算效率。

假设一次乘法运算的复杂度用  $K$  表示, 加法运算的复杂度用  $\Sigma$  表示, 除法运算用  $\Psi$  表示, 减法用  $\Delta$  表示(减法仅在本文方法中使用)。则经典方法的计算复杂度为  $O[n] = [K + (4K + 2\Psi + 4\Sigma)(n - 1)]n$ , 而文献[13]方法的计算复杂度为  $O[n] = [2(\log_2^n - 2)n + 4]\Sigma + (n - 1)(10K + 4\Psi + 8\Sigma) + 2(\log_2^n - 1)n\Psi + n(\log_2^n - 1)K$ , 而对本文方法进行计算复杂度分析, 假设证据源单子焦元个数大于 2, 第 3 节步骤 3 的计算度复杂度为  $n \cdot \Delta$ , 步骤 4 的计算复杂度为  $n \cdot K + n \cdot [2(3K + \Sigma + \Psi) + \Sigma]$ , 步骤 5 的计算复杂度为  $\Sigma + n\Psi$ , 则本文方法的总的计算复杂度为  $O[n] = n \cdot \Delta + n \cdot K + n \cdot [2(3K + \Sigma + \Psi) + \Sigma] + \Sigma + n\Psi = n \cdot \Delta + (3n + 1)\Sigma + 7nK + 2n\Psi$ , 从计算复杂度的理论分析结果上对比, 本文方法计算复杂度与  $n$  呈线性关系, 相比于经典算法和文献[13]方法显著的降低。

## 6 仿真实验结果对比分析

为了验证本文方法的优越性, 本文从融合结果

的相似性、方法的高效性、冲突敏感性及鲁棒性 4 个指标在相同的实验条件下对多种方法进行对比分析。

### 6.1 融合结果的相似性

采用 Euclid 相似度函数<sup>[17]</sup>对融合结果进行相似度分析

$$N_E[m_1, m_2] = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^{D^\Theta} [m_1[X_i] - m_2[X_i]]^2} \quad (12)$$

本文采取蒙特卡洛仿真实验对比 3 种方法的融合结果。假设给定两证据源,  $P^\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{20}\}$ , 对每个证据源的超幂集空间中的焦元进行随机的非零信度赋值。分别进行 1000 次蒙特卡洛仿真实验, 将每次实验随机产生的一对证据, 分别利用经典方法、文献[13]方法和本文方法得到融合结果, 并计算与经典方法融合结果的相似度, 每次的实验结果如图 2 及表 1 所示。(本文所有仿真实验是通过 Pentium(R) Dual-Core CPU E5300 2.6 GHz 2.59 GHz, 1.99 GB 内存的计算机进行 Matlab 仿真实现的。)

经过 1000 次蒙特卡罗仿真实验, 本文方法与经典方法融合结果的平均相似度略高于文献[13]方法

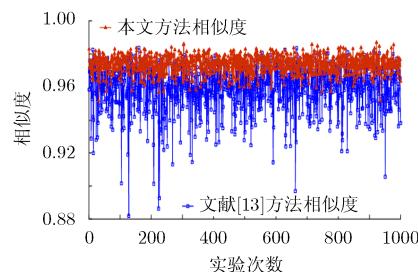


图 2 超幂集空间焦元数目为 20 情况下的蒙特卡洛仿真实验相似度对比

表 1 融合结果对比分析表

方法	平均相似度	最低相似度	最高相似度
文献[13]方法	0.9591	0.8820	0.9840
本文方法	0.9738	0.9519	0.9872

与经典方法融合结果的平均相似度, 且最低相似度在 95% 以上, 说明了本文方法融合结果的高相似性。

### 6.2 融合方法的高效性

第 5 节已经做过了计算复杂度的理论分析, 但为了更直观体现本文方法的高效性, 通过表 2 中含有不同焦元数量的超幂集空间的两个证据源融合算例, 比较 3 种方法的运算性能。

从表 2 可知, 本文方法加法运算次数小于文献[13]方法的 1/3, 乘法运算次数小于文献[13]方法的 1/2, 除运算次数小于文献[13]方法的 1/4, 其增加的焦元个数的减法运算, 由于减法运算量极小, 对运算复杂度影响很小, 本文算法计算复杂度相比于其他方法极小。

### 6.3 冲突敏感性

为了验证本文方法可以有效融合冲突证据源信息, 这里假设两个冲突证据源的超幂集空间为  $D^\Theta = \{a, b, c, d\}$ , 其上的信度赋值如表 3 所示。

假设  $\varepsilon = 0.01$ ,  $x, y \in [0.02, 0.98]$ , 当  $x, y$  分别在 [0.02, 0.98] 变化, 幅度值为 0.01 时, 求得文献[13]的融合结果与经典方法融合结果的相似度如图 3 所示, 同时求得本文方法与经典方法融合结果的相似度如图 4 所示。本文方法与经典方法的融合结果最低相似度为 0.9506, 说明本文的方法, 对于冲突证据源融合问题的处理非常有效。

表 2 3 种方法在不同焦元数量的超幂集空间中运算性能比较

超幂集空间焦元个数	方法	加运算次数	乘运算次数	除运算次数	减法运算
10000	经典方法	399953796	399963796	199976898	
	文献[13]方法	335344	166532	82958	
	本文方法	10001	70000	20000	10000
20000	经典方法	1599901648	1599921648	799950824	
	文献[13]方法	709510	340888	165714	
	本文方法	20001	140000	40000	20000
30000	经典方法	3599846872	3599876872	1799923436	
	文献[13]方法	1085018	520204	244394	
	本文方法	30001	210000	60000	30000
50000	经典方法	9999701168	9999751168	4999850584	
	文献[13]方法	1950442	877918	429000	
	本文方法	50001	350000	100000	50000

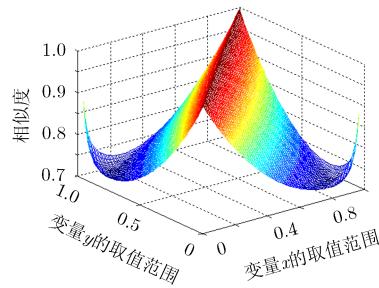


图3 文献[13]方法与经典方法对冲突证据信息融合结果的相似度

表3 两冲突证据源信度赋值算例

证据源	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
$S_1$	$x - \varepsilon$	$\varepsilon$	$1 - x - \varepsilon$	$\varepsilon$
$S_2$	$\varepsilon$	$y - \varepsilon$	$\varepsilon$	$1 - y - \varepsilon$

#### 6.4 鲁棒性

分析可知, 同时改变焦元的赋值顺序不会影响经典方法的融合结果, 因为经典方法是通过各单子焦元与其余各焦元的信度运算求得融合结果的, 而本文方法是通过各单子焦元与其补集焦元的信度运算求得融合结果的, 其融合结果也不随着焦元赋值顺序的改变而改变, 随机给出如表4所示的3个证据源情况的各单子焦元的信度赋值, 其焦元次序和信度赋值次序同时变化时, 本文仿真的融合结果不发生变化, 且其与经典方法的相似度为0.9610, 证明了本文方法具有很强的鲁棒性。

## 7 结束语

DSmT作为一种新的解决高冲突信息融合处理问题的有效方法, 已经在多个领域得到了广泛的应

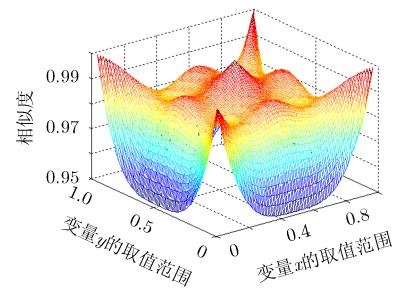


图4 本文方法与经典方法对冲突证据信息融合结果的相似度

用, 但是随着其鉴别框架焦元数目的增多导致其融合结果的计算呈组合爆炸的固有瓶颈一直无法突破, 对该问题的解决不仅有着重要的理论价值, 更有着巨大的应用价值。基于此, 本文研究并提出了一种快速 DSmT-DS 近似推理融合方法, 相比已有的近似推理方法, 本文方法在保证了融合结果准确率的前提下, 计算复杂度极小, 计算效率显著提高, 有效地解决了 DSmT 的计算瓶颈问题。

本文进行的 DSmT 近似算法的研究是建立在超幂集空间中交多子焦元为0的情况下, 对超幂集空间存在交多子焦元信度赋值的复杂情况尚未进行深入研究。在实际应用中的融合信息高冲突背景下, 即使在 DS 模型下, Dempster 组合规则容易产生悖论无法得到较好的结果而使用 DSmT+PCR5 进行融合可以得到更符合实际的结果<sup>[5]</sup>, 在这种情况下, 本文方法可以有效取代 DSmT+PCR5。接下来, 还要做两方面的研究, 一是如何在尽量不提高方法计算复杂度的前提下, 进一步提高近似算法的精度; 二是研究在超幂集空间中存在多子焦元的情况下, 如何有效进行 DSmT 融合推理计算。

表4 多证据源情况的融合结果比较

焦元序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
信源	$S_1$	0.30	0.03	0.07	0.20	0.14	0.06	0.02	0.04	0.04
	$S_2$	0.05	0.21	0.04	0.06	0.10	0.24	0.13	0.07	0.06
	$S_3$	0.10	0.25	0.05	0.10	0.16	0.15	0.07	0.04	0.02
经典方法结果	0.1855	0.2313	0.0238	0.1196	0.1461	0.1779	0.0496	0.0188	0.0266	0.0208
本文方法结果	0.2196	0.2491	0.0115	0.1067	0.1384	0.1992	0.0286	0.0086	0.0136	0.0248

## 参 考 文 献

- [1] 史亚, 姬红兵, 朱明哲, 等. 多核融合框架下的雷达辐射源个体识别[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2484-2490.  
Shi Ya, Ji Hong-bing, Zhu Ming-zhe, et al. Specific radar emitter identification in multiple kernel fusion framework [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10): 2484-2490.
- [2] 李程, 王伟, 施龙飞, 等. 基于多源信息融合的有源雷达组网方式序贯识别方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2456-2463.  
Li Cheng, Wang Wei, Shi Long-fei, et al. Sequential method for netting type recognition of active radars based on multi-source information fusion [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10): 2456-2463.
- [3] 杨露, 沈怀荣, 周伟静, 等. 基于信息融合的故障诊断集成平台设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(1): 132-136.

Yang Lu, Shen Huai-rong, Zhou Wei-jing, et al.. Design and realization of fault diagnosis platform based on information fusion[J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(1): 132–136.

[4] 李嘉菲, 周斌, 刘大有, 等. 海量信息融合方法及其在状态评价中的应用[J]. 软件学报, 2014, 25(9): 2026–2036.

Li Jia-fei, Zhou Bin, Liu Da-you, et al.. Massive information fusion algorithm and its application in status evaluation[J]. *Journal of Software*, 2014, 25(9): 2026–2036.

[5] Smarandache F and Dezert J. Advances and Applications of DSmT for Information Fusion: Vol 3[M]. USA: American Research Press, 2009: 54–58.

[6] Li X, Dezert J, Smarandache F, et al.. Combination of qualitative information with 2-Tuple Linguistic Representation in DSmT[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2009, 24(4): 786–798.

[7] Li X, Dai X, Dezert J, et al.. Fusion of imprecise qualitative information[J]. *Applied Intelligence*, 2010, 33(3): 340–351.

[8] Li X, Huang X, Dezert J, et al.. A successful application of DSmT in sonar grid map building and comparison with DST-based approach[J]. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2007, 3(3): 539–551.

[9] 李新德, 黄心汉, 戴先中, 等. 基于 DSmT 融合机的移动机器人环境感知研究[J]. 华中科技大学学报, 2009, 37(12): 64–67.

Li Xin-de, Huang Xin-han, Dai Xian-zhong, et al.. Study on environment perception of mobile robots using DSmT-based fusion machine[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2009, 37(12): 64–67.

[10] 辛玉林, 邹江威, 徐世友, 等. DSmT 理论在综合敌我识别中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2385–2388.

Xin Yu-lin, Zou Jiang-wei, Xu Shi-you, et al.. Application of DSmT in integrated identification of friend-or-foe[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(11): 2385–2388.

[11] 覃东升, 苗壮, 王勇. 改进的 DSmT 算法及其在 C<sup>4</sup>ISR 系统中的应用[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(4): 592–595.

Qin Dong-sheng, Miao Zhuang, and Wang Yong. Improved method based on DSmT and its application in C<sup>4</sup>ISR system[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2014, 43(4): 592–595.

[12] 李新德, 潘锦东, Jean D. 一种基于 DSmT 和 HMM 的序列飞机目标识别算法[J]. 自动化学报, 2014, 40(12): 2862–2876.

Li Xin-de, Pan Jin-dong, and Jean D. A target recognition algorithm for sequential aircraft based on DSmT and HMM[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(12): 2862–2876.

[13] 李新德, Jean D, 黄心汉, 等. 一种快速分层递阶 DSmT 近似推理融合方法(A)[J]. 电子学报, 2010, 38(11): 2566–2572.

Li Xin-de, Jean D, Huang Xin-han, et al.. A fast approximate reasoning method in hierarchical DSmT(A)[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(11): 2566–2572.

[14] 李新德, 杨伟东, 吴雪建, 等. 一种快速分层递阶 DSmT 近似推理融合方法(B)[J]. 电子学报, 2011, 39(3A): 31–36.

Li Xin-de, Yang Wei-dong, Wu Xue-jian, et al.. A fast approximate reasoning method in hierarchical DSmT(B)[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3A): 31–36.

[15] 邓勇, 王栋, 李齐, 等. 一种新的证据冲突分析方法[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(6): 839–844.

Deng Yong, Wang Dong, Li Qi, et al.. A new method to analyze evidence conflict[J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(6): 839–844.

[16] 蒋雯, 彭进业, 邓勇. 一种新的证据冲突表示方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(3): 562–565.

Jiang Wen, Peng Jin-ye, and Deng Yong. New representation method of evidential conflict[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(3): 562–565.

[17] Li X, Jean D, Smarandache F, et al.. Evidence supporting measure of similarity for reducing the complexity in information fusion[J]. *Information Sciences*, 2011, 181(10): 1818–1835.

郭 强: 男, 1986 年生, 讲师, 研究方向为信息融合、辐射源识别、态势评估、DSmT、证据网络等.

何 友: 男, 1956 年生, 教授, 中国工程院院士, 研究方向为信息融合等.

李新德: 男, 1975 年生, 副教授, 研究方向为 DSmT、信息融合、自动导航、多传感器多目标跟踪、目标自动识别等.